碳中和目标下美国氢能战略转型及特征分析

魏 凤[1,3,5*] 任小波[2] 高 林[4] 高国庆[1,3,5] 周超峰[1,3,5]

1 中国科学院武汉文献情报中心 武汉 430071
2 中国科学院 重大科技任务局 北京 100864
3 科技大数据湖北省重点实验室 武汉 430071
4 中国科学院工程热物理研究所 北京 100190
5 中国科学院大学 图书情报与档案管理系 北京 100049

摘要 氢能作为实现碳中和目标的重要清洁能源受到了全球瞩目。鉴于美国有逾30年的氢能研发和应用实践经验，文章对美国政府制定的氢能发展规划和战略开展详细调研，分析了自1990年以来的美国氢能战略及发展目标、方向、成效，并重点剖析美国2020年最新氢能发展战略和2021年氢能攻关计划。文章认为，当前美国氢能战略已经从最初建立氢能技术储备和推动氢燃料电池在交通行业的应用，转变为推进碳中和目标下加快氢能全链条、低成本技术开发应用，尤其是绿氢技术的研发和商业化等方向，具有实现碳中和目标、建立和发展氢经济、在全球氢能技术和市场中占主导地位等多元化目标；同时，美国在电解水技术方面具有较为成熟的研发示范经验，未来将向兆瓦级规模和太阳能、核能等可再生能源清洁制氢等方向发展。基于以上研究和分析，文章针对我国氢能战略提出了加强氢能发展顶层设计、攻关突破氢能核心技术、建立氢能全技术链发展模式、加强对外合作、开展标准制定和知识产权保护等建议。

关键词 氢能战略，碳中和，全链条，加速商业化，技术储备

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20210730002

氢能是一种清洁高效的二次能源；发展氢能技术对于构建清洁低碳、安全高效现代能源体系，保障国家能源安全，改善大气环境质量，以及推进能源产业升级等具有重要意义[1-3]。作为能源，氢具有2个明显的优势：① 高能量密度——氢的单位质量的热值约是煤炭的4倍、汽油的3.1倍、天然气的2.6倍[4]；② 能

*通信作者

资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（B类）培育项目（XDPB21），国家电网公司科技项目（524625190024），中国科学院标准化试点项目（BZ20180002）
修改稿收到日期：2021年8月27日

被储存且可实现灵活的时间转移或地域转移，来源多样，终端零排，应用领域广泛等[5,6]。

随着全球气候压力增大及能源转型加速，氢能在实现各国碳中和目标上将发挥重大积极作用。中国与美国、日本、韩国、欧盟等全球主要发达国家和地区都高度重视氢能的发展，许多国家与地区都将氢能上升到能源战略高度[7,8]。美国能源部为了响应拜登总统提出的应对气候变化目标①，启动实施能源攻关计划，把氢能作为推动全球能源转型和应对气候变化的一种可行性技术来大力发展[9]。据国际氢能委员会预计，到2050年全球范围内氢能占全部能源消费的比重将提高到18%，氢经济的市场规模将达到2.5万亿美元[10]。

美国是全球较早提出氢能发展规划的国家。美国政府自1990年制定推动氢能源产业发展的各项政策至今逾30年，始终保持着从政策评估、商业化前景预测，到方案制定、技术研发，再到示范推广的发展思路。随着全球气候变化的压力增大，美国的氢能战略在碳中和目标下发生了新的转变[11]。本文将对美国氢能发展战略的目标、内涵、特点及新时期美国氢能战略变化情况做详细分析，以期为我国氢能政策的制定提供参考支撑。

1 美国氢能发展战略的历程剖析

美国是全球较早提出氢能研究和应用的国家，美国政府自1990年至今颁布了多项推动氢能发展的政策和行动计划。概括起来，美国政府氢能政策的发展分为4个阶段（表1）。

通过表1可见，美国政府确定氢能为能源供应的方向之一和开展氢能技术研发示范的时间长达31年，已经形成“制氢—运氢—储氢—用氢”的全技术链能力，为规模化发展氢能奠定了可靠的科学基础；同时也表明，经过多年探索，美国对氢能未来的应用方向具有较为成熟的认识。2019年11月，美国燃料电池和氢能源协会（FCHEA）在其发布的《美国氢能经济路线图执行概要报告》中指出：在过去10年中，美国能源部对氢能和燃料电池每年资助约1亿—2.8亿美元的研发经费，尤其是2017年以来每年约投入1.5亿美元研发经费[14]；美国能源部计划2020—2022年，实现氢能在小型乘用车、叉车、分布式电源、家用热电联产、碳捕捉等领域的应用；到2030年，预计美国氢能经济每年可产生约1400亿美元的收入，并在整个氢价值链中提供70万个工作岗位；到2050年，预计美国每年将创造约7 500亿美元的收入和累计340万个就业机会来推动经济增长；同时，到2050年，氢能将占据美国能源需求14%的比例②。这反映出推动氢能技术全链条产业化发展、建立新的经济增长点及反哺社会将是美国政府未来推动氢能发展的重点工作。

2 新时期美国氢能战略发展的主要特征

随着全球气候变化极端事件频发，在美国氢能技术研发体系日趋完善和成效日益彰显的前提下，美国政府将重点考虑氢能在实现本土碳中和目标中应发挥的作用。2021年2月，美国政府宣布重返《巴黎协定》谈判，这促使美国在气候目标下重新定位氢能在能源结构和全球市场中的位置并做出新的部署。2020年11月12日，美国能源部在2002年规划基础上，发布最新版《氢能计划发展规划》[15]，提出未来10年及更长时期氢能研究、开发和示范的总体战略框架，并设定了到2030年美国氢能发展的技术和经济指标，其主要内容包括以下3方面。

① 到2030年实现碳排放在2005年基础上削减50%—52%，到2035年100%使用清洁能源，到2050年实现净零排放。

② The Fuel Cell and Hydrogen Energy Association (FCHEA). Road map to a US hydrogen economy: New report offers road map to us hydrogen energy leadership. [2019-11-06]. https://www.fchea.org/us-hydrogen-study.

表1　美国氢能战略的4个阶段（1990—2030年）

Table 1　Four stages of American hydrogen energy strategy from 1990 to 2030

阶段	时间	标志性政策	主要内容	目标	实施效果
第一阶段：氢能论证和构建形成“制、储、运、用”技术链	1990—2001年	1990年的《氢研究、开发及示范法案》和1996年的《氢能前景法案》，标志着美国政府确定氢能为未来能源发展的方向之一，开始开展氢能技术研究	● 制定氢能研发5年管理计划 ● 投入1.6亿美元用于氢能生产、储运和应用技术研发 ● 重点论证氢能技术的可行性	在最短时间内，采用较为经济的方法，突破氢生产、储运和应用过程中的关键技术	通过前沿技术探索、商业应用可行性论证等阶段，美国基本确定氢能产业的发展方向
第二阶段：氢能技术发展方向遴选和重点领域（交通）关键核心技术研发	2002—2012年	● 2002年的《国家氢能发展路线图》，标志着美国氢能产业开发进入行动阶段 ● 2003年，发布《总统氢燃料倡议》 ● 2004年，发布《氢立场计划》 ● 2005年，通过《能源政策法案》	● 计划在5年内投资12亿美元研发氢能生产和储运技术，促进氢燃料电池汽车技术及相关基础设施在2015年前实现商业化 ● 开展氢能与燃料电池项目 ● 明确氢能产业发展要经过研发示范、市场转化、基础建设和市场扩张、建立氢能社会等4个阶段	正式启动氢能与燃料电池研究计划，推动氢能燃料电池充电基础设施建设	在美国境内建成了一批氢能应用基础设施
第三阶段：氢能燃料电池及其他配套技术的研发和推广应用	2013—2020年	2014年《全面能源战略》，确定氢能在交通转型中的引领作用	● 2013年政府预算中，有63亿美元拨给美国能源部用于氢能、燃料电池、车用替代燃料等清洁能源研发，并对美国境内氢能基础设施实行30%—50%的税收抵免 ● 在2019年实施的氢能计划中，拨4000万美元资助氢能技术研发，旨在通过技术早起应用推进氢能和燃料电池技术突破	通过新材料的研发推动制氢技术的发展，包括面向碱性燃料电池应用的阴离子交换膜设计和制备、新型涂层材料改善固体氧化物电解槽的化学稳定性、开发高氢气通量的薄膜固体氧化物电解槽、用于水裂解产氢电解槽的质子交换膜性能和耐久性研究、开发用于光电化学电池的钙钛矿/钙钛矿串联的光电极、开发复合催化剂材料构建Z-scheme催化体系并进行性能评估、新型高熵钙钛矿氧化物提升热解产氢稳定性、针对低温热解产氢探索和开发新材料、开发能够催化裂解污水产氢的非贵金属催化剂、开发多功能的氧电极用于长寿命的电解水制氢、采用3D/2D复合的疏水性钙钛矿催化剂实现高效的太阳光驱动电解水制氢	加快氢能基础设施的建设及其在交通运输业中的应用，同时重视制氢和储氢领域相关新材料的研发
第四阶段：在碳中和目标下，全面推动氢能发展，重点关注绿氢技术的研发和应用推广	2020—2030年	2020年11月，美国能源部发布《氢能计划发展规划》	提出未来10年及更长时期氢能研究、开发和示范的总体战略框架，明确氢能发展核心技术领域、需求和挑战，提出氢能技术主要经济目标，首次明确氢能在实现碳中和目标中的作用	加快推动成熟氢能技术商业化应用，重点开发可再生能源制氢、核能制氢等清洁制氢技术	2021年6月，美国启动第一批氢能攻关计划，目标是在未来10年使清洁氢能价格降低80%至1美元/千克

（1）设定氢能全链条中重点发展技术的技术和经济指标，期望通过技术创新，提高技术稳定性和效率，降低成本，加快一批氢能技术或产品的商业化应用（表2）。从表2给出的明确技术指标和经济指标来看，美国有望在氢能全链条环节的一些技术领域率先实现商业化发展。

（2）美国加大对氢能其他技术的设计和攻关，期望进一步为美国氢能经济提供更多的多元化选择（表3）。通过研究可再生能源、化石能源和核能制氢技术，开发多种氢源；通过开发氢能分配先进技术、储氢介质及储氢设施，满足各种规模的氢储运的需求；通过进一步开发高性能燃料电池和合成燃料产品等，拓展氢能应用领域。

（3）开展氢能标准的研究和制定。为了配合氢能技术、设备、材料、制造工艺的产业化，美国计划开展标准化制造流程、质量控制和优化制造设计等研究，期望制定适用、统一的标准，保障氢能生产、输配、储存和应用等安全性、规模化、统一化和质量流程，以提供最佳实践经验和做法。

为了落实上述《氢能计划发展规划》，美国能源部于2021年6月7日启动首个名为"氢能攻关"（Hydrogen Shot）的计划并征集相关项目，目标是在未来10年（2020—2030年）使可再生能源、核能和热能转化制造清洁氢能的价格降低80%至1美元/千克（目前可再生能源制氢价格为5美元/千克），增加5倍清洁氢能生产的产量，进一步加大减少碳的排放[16]。该计划的项目征集信息主要为：① 从氢的生产、氢的来源和氢的应用基础设施方面，征求能够开展氢能示范项目的理想地区。此类地区应具备可用于清洁氢生产和基础设施建设的必要资源，包括但不限于水、可再生能源、

表2　美国《氢能计划发展规划》提出未来10年（2020—2030年）要达到的关键技术经济指标

Table 2　Key technical and economic indicators of the next ten years in *Department of Energy Hydrogen Program Plan* of USA

技术阶段	技术经济指标
制氢阶段	电解槽：运行寿命8万小时、成本300美元/千瓦、转换效率65%
运氢阶段	交通部门氢输配成本：初期降至5美元/千克，最终降至2美元/千克
储氢阶段	●车载储氢系统的成本：将能量密度2.2千瓦时/千克、1.7千瓦时/升降到8美元/千瓦时 ●便携式燃料电池电源系统成本：将能量密度1千瓦时/千克、1.3千瓦时/升降到0.5美元/千瓦时 ●储氢罐用高强度碳纤维成本达到13美元/千克
用氢/氢产品阶段	●工业和电力部门用氢价格：1美元/千克 ●交通部门用氢价格：2美元/千克 ●用于长途重型卡车的质子交换膜燃料电池系统成本降至80美元/千瓦，运行寿命达到2.5万小时 ●用于固定式发电的固体氧化物燃料电池系统成本降至900美元/千瓦，运行寿命达到4万小时

表3　美国提出的氢能其他技术

Table 3　Other technologies for hydrogen energy proposed by USA

技术阶段	氢能新技术
制氢阶段	在开发成本更低、效率更高、更耐用的电解槽的同时，研发可再生能源、化石能源和核能制氢技术等
运氢阶段	开发氢能分配的先进技术，包括液化和化学储氢载体、氢气输运的通行权和许可权
储氢阶段	开发更高容量、重量和体积更小的储氢介质；开发大规模储氢设施
用氢/氢产品阶段	开发大规模、低成本、更耐用和更可靠的燃料电池； 开发以高浓度氢或纯氢为燃料的涡轮机； 开发氨生产及利用氢气和二氧化碳生产合成燃料的技术等

核能、天然气，或从其他废物（如垃圾填埋场、火炬气、废水处理）中获得的能源资源。② 分析氢能示范项目理想地区的现有和潜在用户及案例，如在工业、交通、化学品制造、保障电网安全和其他领域的需求案例。③ 研究氢能价值链下的温室气体和其他污染物减排潜力。④ 分析实施氢能示范项目可能需要的基础科学、基础或应用研究，以及创新的需求、需要的系统集成或原型设计设施。“氢能攻关”计划使美国开始了从化石能源制氢（灰氢、蓝氢）为主，向以可再生能源制氢（绿氢）为主的转变。

3 碳中和目标下美国氢能新政的启示

根据美国总统拜登提出的应对气候变化目标，美国加快推动氢能技术的研究和商业化步伐，从中具体可得出5个方面启示。

（1）使氢能成为比肩电力的重要能源形式。依照美国最新氢能战略目标，到2030年，氢能产业创造营收将为1 400亿美元和70万就业岗位；到2050年可贡献全美工业行业16%的二氧化碳减排量，氢能在全美能源需求中的占比将达到14%，从而成为比肩电力的重要终端能源形式。

（2）美国开展氢能技术研发及产业化具有多目标性，同时更加重视清洁制氢技术的研发和产业化。美国经过30年的氢能技术全技术链研发，已经从最初（20世纪90年代）将氢能作为能源储备技术、调整和优化美国能源结构、重点发展氢能燃料电池产业等目标，转型到建立和发展氢经济、应对碳中和目标、提振经济、加快“制氢—运氢—储氢—用氢”全链条技术商业化、争取全球氢技术主导地位（2020年迄今）等多目标。同时，美国更加注重电解水制氢、可再生能制氢、核能制氢等绿色清洁制氢技术的研发。上述举措不仅促使美国全面转型建立清洁能源结构体系，还可使其在全球氢能全链条技术和经济发展体系中占据主导地位。

（3）重视“制氢—运氢—储氢—用氢”全链条技术的研发和规模化示范，研究氢能关键核心技术，打通美国氢能产业技术链、产业链、供应链等关键环节，为美国氢能技术和产业自立自强奠定坚实的科技基础。① 在制氢方面，设计并开发了电解槽制氢技术、化石能源重整、气化和热解制氢技术、核能制氢技术、生物质和废弃物制氢技术、混合制氢技术、可再生能源制氢技术等。例如，2020年美国能源部已经启动兆瓦级和吉瓦级电解槽设备的研制。② 在运氢方面，开发了氢气分配和输送系统，包括液化和化学储氢技术等，建设运氢基础设施。③ 在储氢方面，开发储氢系统、储氢设施、储氢介质等，包括研究和提供应急供应和地质储氢方案。④ 在用氢方面，在氢作为原料进行转化的技术中，开发氢燃料电池技术、高浓度氢涡轮机系统等。

（4）把经济指标和技术指标结合起来作为技术创新的评估指标，其本质上是提速本土氢能商业化应用，获取美国在全球氢能技术和市场的先发优势。从美国1990年氢能政策制定伊始，美国政府通过充分调研和论证，确定了当时氢能技术全链条研发方向，研究氢能在工业、住宅、运输等方面的技术可行性，并把应用重心放在氢能燃料电池在交通运输领域应用上。但是，随着全球气候的压力增大，尤其是2021年初新一届美国政府成立，美国应对气候目标、推动氢能应用和建立氢能经济系统的步伐明显加大加快，这反映出美国对推动氢能发展的急迫性。

（5）重视氢能相关新材料技术的研发，期望以此推动关键氢能装备技术的变革性升级。美国在制定氢能发展规划和部署研究项目时充分秉承了“材料是促进一切科技变革的基石”这一理念，自2014年开始，美国能源部就开始在制氢技术环节部署了多个新材料研制项目，主要包括燃料电池离子交换膜的研制、电解槽新型涂层材料研制、各类催化剂材料的开发等，期望提升制氢技术的稳定性和耐久性。2020年美国能

源部还在碳纤维等高强度储运氢新材料的研究上投入高达3 200万美元的开发经费。

4 我国氢能发展现状

（1）*技术层面*。我国在氢能的基础研究方面有持续投入，但起步较晚，积累较少。近20年来，在科学技术部和中国科学院等部门相关项目的资助下，我国在氢能领域取得了一些领先世界的重要成果。特别突出的是，由中国科学院大连化学物理研究所李灿院士团队研发的人工光合成太阳燃料技术，提出了利用太阳能等可再生能源生产“绿色”氢能，并将二氧化碳加氢转化为甲醇等液体燃料的“液态阳光”合成技术路线。2020年1月，该技术的示范项目投料试车成功，标志着这一领先世界的研发技术在我国碳中和过程中可能起到重要的作用。在太阳能微藻制氢领域，由中国科学院植物研究所黄芳研究员团队研发了面向“绿色藻氢”生产的太阳能光生物转化制氢创新技术。该技术利用自主研发的、产氢量居微藻光合产氢领域之首的微藻材料，建立了实验室规模的、以微藻光合作用为基础的“绿色藻氢”种质创制—氢气生产—氢气收集储存—氢燃料电池应用的完整技术体系，为进一步面向国家碳中和目标的相关研发奠定了重要基础。

（2）*政策层面*。2019年国家发展和改革委员会发布的《产业结构调整指导目录》，鼓励发展高效制氢/运氢及高密度储氢技术开发应用及设备制造、加氢站、新能源汽车关键零部件。2021年，科学技术部发布“氢能技术重点专项”，以支持氢能绿色制取与规模转存体系、氢能安全存储与快速输配体系、氢能便捷改质与高效动力系统技术研发。2019年，广东、山西等10个省份将发展氢能写入政府工作报告，北京、上海、苏州、佛山、嘉兴等超过17个省份的22个城市出台了本地氢能产业发展规划或行动计划，从产值规划、加氢站建设、推广示范车辆数量、企业扶持等方面进行了相对详细的规划，通过人才、资金、示范运营等多举措加速氢能及燃料电池产业布局。

（3）*战略层面*。我国氢能技术研发和应用上存在缺乏统一规划、关键核心技术尚未突破、总成本过高、技术专利壁垒严重等问题，亟待通过打破相关技术壁垒来改善产品质量和技术先进性问题，以提升我国氢能及相关应用链在国际上的战略优势。与美国蓝氢、绿氢等氢能技术路线相比，我国亟待研判蓝氢与绿氢③技术路线之间的关系，以及氢与电共同作为终端消费能源的互补性问题。

（4）*技术难题*。与美国蓝氢、绿氢等氢能技术路线相比，我国蓝氢与绿氢的成本及未来下降潜力差异很大。例如，我国规模意义下的“光伏+电解”技术制氢的全链能量转化效率仅为15%左右，对应成本为12—18美元/千克，是天然气重整制氢成本近10倍。除氢气生产需要提高效率、降低成本以外，氢气的储运也存在一些技术难题，氢气储存方式可以分为物理储氢（包括高压气态储氢、低温液氢技术、吸附储氢等）和化学储氢（利用储氢介质与氢气反应生成稳定化合物，再通过改变条件实现放氢的技术，主要包括有机液体储氢、液氨储氢、配位氢化物储氢、无机物储氢和甲醇储氢等）。国内的物理储氢技术发展相对落后，以高压气态储氢为例，储罐关键材料仍依赖进口，储氢量低。相对于物理储氢，化学储氢具有能量密度高和相对安全的特点，未来有望替代物理储氢成为主流技术。但目前大部分化学储氢技术还处于研发阶段，成本相对较高。

5 关于我国氢能发展的思考与建议

综上所述，与美国氢能战略相比，我国氢能发展

③ 蓝氢是指使用石化燃料制氢，同时使用碳捕获与封存技术处理产生的二氧化碳。绿氢是可再生能源（如风电、水电、太阳能等）制氢，制氢过程完全没有碳排放。

存在研发创新不足、成果分享和资源整合不够、缺乏人才及交流合作、标准和知识产权保护缺乏等问题，建议从国际、国内需求和供给方面系统研究我国氢能发展规划，多角度、全方位提升我国氢能技术和产业的国际竞争力，避免氢能成为下一个“卡脖子”技术。具体提出3个方面建议。

（1）加强顶层设计，集中国家优势力量，开展氢能关键技术、新技术路线及其应用的创新攻关，从核心技术上突破市场封锁。氢能已被视为未来主要能源，氢气的制取是发展氢能产业的基础。如何高效、清洁制氢对氢能的发展具有重要意义。因此，研究并获取高效、低成本、大规模的制氢方法是氢能产业发展的前提与基础。从国际经验来看，建议加大对绿氢尤其是可再生能源制氢技术及相关制氢、储氢、运氢材料的研发研制。加强对氢能储备与氢能应用技术、氢能应用成套设备的研究，从技术链、产业链和供应链等角度开展氢能应用技术的研究，尤其是关键技术、核心技术上的攻关，开发具有自主产权的核心技术和关键技术。

（2）开展氢能技术链、产业链、供应链专利壁垒与竞争系统研究，提出知识产权保护策略，提升国际竞争力。解决氢能市场发展的技术专利壁垒和知识产权问题，需要密切跟踪国内外氢能技术专利的发展动态，详细开展国内外氢能技术专利的调研分析；建立有效促进氢能产业发展的氢能技术专利发展路径，为氢能技术专利壁垒研究和相关政策规划的出台提供参考建议，真正提升我国和相关地区氢能产业国际竞争力。由于氢能产业技术复杂多样，产业交织融合，以及专利保护工作缺少目标指引，需要从全球视角，全面调研氢能产业技术链及发展情况，挖掘氢能领域的关键技术分布、重点技术研发趋势、最新技术发展动向，识别潜在应用技术和专利空白技术。

（3）重视国际合作，建立和国际组织、其他国家全链条多边合作关系，积极参与国际规则、国际标准的制定工作，为我国氢能技术进入国际市场做好前期准备。以“一带一路”倡议为抓手，与周边友好国家、“一带一路”友好国家开展氢能全技术链的产、学、研、用等合作，不仅可以建立氢能同盟关系，还可以摸清并开发氢能国际市场。同时，在国际标准化组织、国际电工组织等相关国际机构内申请建立氢能标准工作下属部门或工作组，开展国际相关规则、标准的制定，争取国际话语权，为氢能相关技术和产品进入国际市场扫清障碍。

致谢 感谢中国科学院植物研究所黄芳在论文完成过程中给予的指导和帮助。

参考文献

1 陆颖. 德欧氢能发展规划新动向. 科技中国, 2020, (12): 99-104.

2 王震, 陈永健. 能源转型背景下石油公司的战略选择. 北京石油管理干部学院学报, 2019, 26(2): 8-13.

3 He J K, Zhou J, Liu B, et al. Global Trend of Low-carbon Economy and China’s Responses. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2011, (2): 5-19.

4 张勇. 重庆低碳能源开发潜力研究. 中国国情国力, 2021, (3): 69-72.

5 丁瑶瑶. 未来应发挥好氢能“碳中和”生力军作用. 环境经济, 2021, (6): 40-43.

6 Zou C, Xiong B, Xue H, et al. The role of new energy in carbon neutral. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 480-491.

7 黎喜坤. 基于专利计量的氢能产业发展态势及国内产业园区定位分析. 中国发明与专利, 2020, 17(12): 77-82.

8 Stangarone T. South Korean efforts to transition to a hydrogen economy. Clean Technologies and Environmental Policy, 2021, 23(2): 1-8.

9 郑嘉禹, 杨润青. 美国正式重返《巴黎协定》. 生态经济,

2021, 37(4): 1-4.

10 凌文, 刘玮, 李育磊, 等. 中国氢能基础设施产业发展战略研究. 中国工程科学, 2019, 21(3): 76-83.

11 赵旭, 杨艳, 高慧. 世界主要国家和能源企业加快氢能产业布局. 中国石化, 2019, (5): 16-21.

12 何盛宝, 李庆勋, 王奕然, 等. 世界氢能产业与技术发展现状及趋势分析. 石油科技论坛, 2020, 39(3): 17-24.

13 朱之飞. Nb(W,Mo)-Ti-Ni氢分离合金微观组织与氢传输性能. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

14 赵青, 郑佳. 全球主要国家2019年氢能发展政策概述. 全球科技经济瞭望, 2020, 35(4): 11-20.

15 US Energy Department. Energy department hydrogen program plan. [2020-11-12]. https://www.energy.gov/articles/energy-department-releases-its-hydrogen-program-plan.

16 Department of Energy. Secretary granholm launches hydrogen energy earthshot to accelerate breakthroughs toward a net-zero economy. [2021-06-07]. https://www.energy.gov/articles/secretary-granholm-launches-hydrogen-energy-earthshot-accelerate-breakthroughs-toward-net.

Analysis on Transformation and Characteristics of American Hydrogen Energy Strategy under Carbon Neutralization Goal

WEI Feng[1,3,5*]　REN Xiaobo[2]　GAO Lin[4]　GAO Guoqing[1,3,5]　ZHOU Chaofeng[1,3,5]

（1 Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2 Bureau of Major R&D Programs, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China;
3 Hubei Key Laboratory of Big Data in Science and Technology, Wuhan 430071, China;
4 Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
5 Department of Library, Information and Archives Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract As an important means to achieve the goal of carbon neutralization, hydrogen energy has attracted global attention. As the United States has more than 30 years of practical experience in hydrogen energy R&D and application, this study conducts a detailed investigation on the hydrogen energy development plan and strategy formulated by the U.S. government, analyzes the U.S. hydrogen energy strategy and development objectives, direction and achievements since 1990, and focuses on the latest U.S. hydrogen energy development strategy in 2020 and the hydrogen energy breakthrough plan in 2021. It is concluded that the current US government has moved from initially establishing hydrogen energy technology reserves and promoting the application of hydrogen fuel cells in the transportation industry to accelerating the R&D and commercialization of the low-cost whole chain of hydrogen energy, especially green hydrogen technology under the goal of carbon neutralization, with diversified goals such as realizing the goal of carbon neutralization, establishing and developing hydrogen economy, and occupying a leading position in the global hydrogen energy technology and market. At the same time, the United States has relatively mature R&D and demonstration experience in electrolytic water technology. In the future, it will develop in the direction of megawatt scale and clean hydrogen production from renewable energy such as solar energy and nuclear energy. Based on such analysis, it is suggested that China should strengthen top-level design of hydrogen energy development, tackle key problems and breaking through core technologies of hydrogen energy, establish the development model of the

*Corresponding author

whole hydrogen energy technology chain, strengthen international cooperation, formulate standards, and protect intellectual property.

Keywords hydrogen energy strategy, carbon neutralization, whole chain, accelerate commercialization, technical reserve



魏 凤 中国科学院武汉文献情报中心研究员、博士生导师。主要研究领域：战略情报与标准研究、科技决策与标准情报、标准战略与知识产权战略等。主持中国科学院、国家自然科学基金委员会等单位的30多项课题，出版著作10多部，发表论文80余篇。E-mail: weif@mail.whlib.ac.cn

WEI Feng Professor of Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences (CAS). Her main research fields cover standard intelligence and standard strategy, standard and intellectual property strategy, standard and science and technology development trend, standard and science and technology policy, etc. She has presided over more than 30 projects sponsored by CAS and National Natural Science Foundation of China. She has published more than 10 books, and 80 papers. E-mail: weif@mail.whlib.ac.cn

■责任编辑：文彦杰